

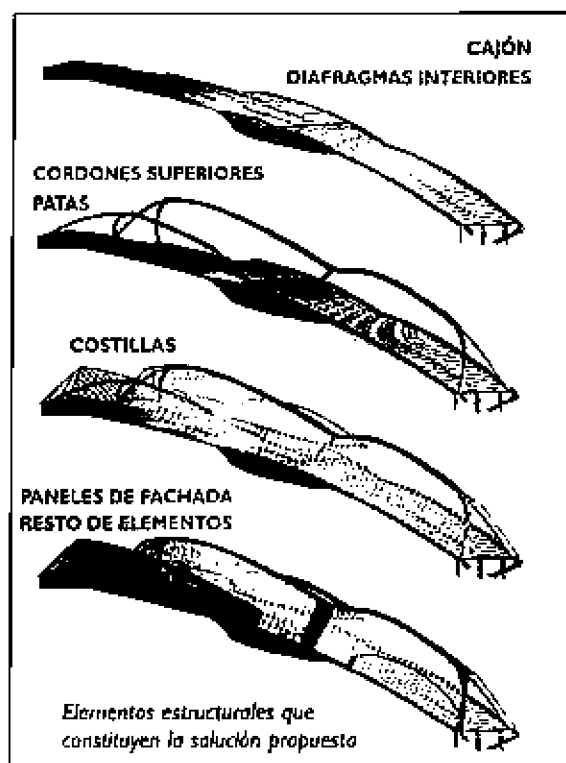
**E**l Pabellón-Puente es un edificio sobre el río Ebro que sirve como puerta de entrada al recinto de la Expo 2008 a la vez que alberga en su interior espacios expositivos, dispuestos en varios niveles. Es un proyecto en el que la estructura es protagonista esencial, por su complejidad y porque está fuertemente integrada en el concepto arquitectónico.

Se trata de una estructura de 280 m de longitud, planteada con dos vanos de 125 y 155 m de luz, respectivamente. La geometría en planta es curva y la sección transversal es variable en anchura, altura y geometría. El tránsito peatonal está organizado en cuatro niveles; dos inferiores situados a las cotas 203.60 y 205.10 y dos superiores situados a las cotas 208.30 y 209.60. Todos ellos están comunicados a través de cuatro rampas interiores.

El volumen del Pabellón-Puente está articulado en cuatro cuerpos o pods: dos centrales uno a continuación del otro, que constituyen la zona de paso, y dos laterales, que contienen los espacios expositivos.

Con esta geometría el concepto estructural consiste en una viga de dos vanos de sección transversal variable con un cordón superior continuo, en los cuerpos de la zona de paso, y otros discontinuos, en los cuerpos laterales, un cordón inferior formado por un cajón cerrado y situado por debajo de la cota 203.60 y una celosía de unión entre ambos cordones, designada como diagrid, que en ciertas zonas está interrumpida por la presencia de ventanas. En los extremos del puente y en la zona del apoyo central, el cordón superior y el inferior también están vinculados por otros elementos inclinados de geometría compleja llamados patas.

En sentido longitudinal, la estructura del puente está modulada en secciones transversales separadas 3.60 m. Coincidiendo con estas



secciones se han plantado diafragmas transversales en el interior del cajón, de los que salen, en dirección a los cordones superiores, costillas que conectan el cordón superior con el cajón. Entre costillas se encuentran los paneles del diagrid.

## EL PROYECTO

La geometría es extraordinariamente variable, compleja y muy condicionada. El cajón inferior está resuelto con chapas, casi siempre planas, entre secciones transversales. En algunas zonas, debido a los fuertes cambios de geometría, como en la zona próxima al apoyo intermedio,





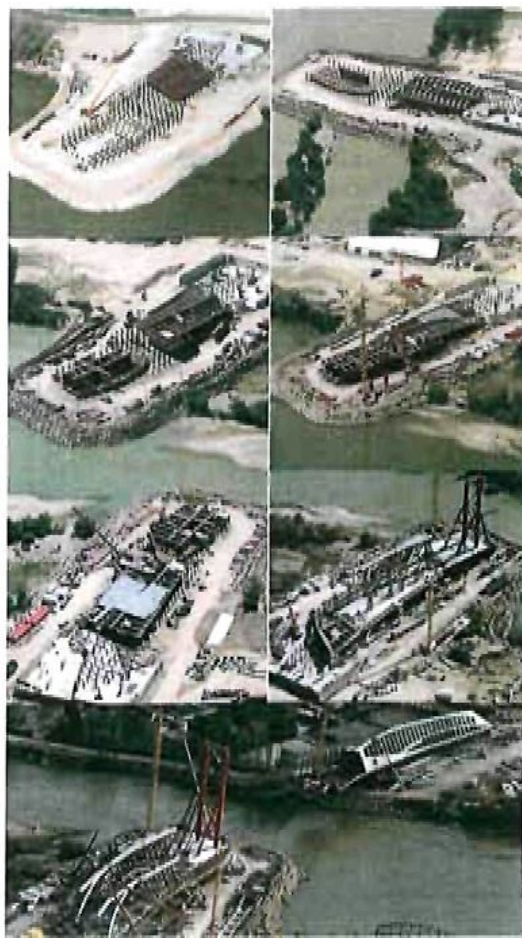
son alabeadas. Los cordones superiores tienen distinta geometría dependiendo del cuerpo al que pertenezcan. Entre costillas los paneles diagrid son en su mayoría planos, pero debido a la geometría variable del puente entre los paneles y que en su coincidencia con las costillas hay variaciones, los planos de los diagrids giran ligeramente. Las patas tienen geometrías alabeadas en el espacio.

Las uniones entre los distintos elementos son todas distintas y muy complejas, haciendo imposible, en la mayoría de los casos, la definición de uniones tipo.

Por estos motivos, durante todo el desarrollo del proyecto fue necesario un trabajo iterativo entre los cálculos estructurales y la ejecución de modelos y diseños de detalles para la producción en taller.

En primer lugar se planteaba el concepto estructural para cualquier elemento para, posteriormente, proceder al estudio pormenorizado de cada detalle, que se definía con croquis y luego se dibujaba en 2D, a partir de una geometría específica. Después se llevaba este concepto a un modelo 3D, que servía para identificar los problemas particulares de cada caso. Estos podían ser de diversos tipos: estructurales, geométricos o de montaje. Estructurales porque la adaptación de un determinado detalle a una determinada geometría podía ser inválida desde el punto de vista estructural. Geométricos porque en ocasiones los detalles diseñados interferían con revestimientos

**Arriba, montaje de la parte Sur. Debajo montaje de la estructura metálica de la parte Norte.**



interiores o alteraban la apariencia del edificio. Y de montaje porque el diseño en 3D de los detalles permitía anticipar la existencia de futuros problemas en el montaje y así corregirlos. Una vez resueltos los puntos problemáticos, se realizaban las correcciones oportunas del modelo 3D inicial para reflejar exactamente el detalle o elemento planteado. Finalmente, esta información se utilizaba como modelo para la generación de los planos de taller.

## ESTRUCTURA METÁLICA

Desde el principio se planteó la construcción de la estructura dividida en dos partes. La norte, de geometría muy compleja, se construyó cimbrada sobre una península provisional ganada al río. La sur, de geometría más sencilla, se construyó fuera de su emplazamiento definitivo para, posteriormente, empujarla sobre el cauce del río Ebro hasta colocarla en su posición definitiva.

La gran mayoría de las piezas que forman la estructura se fabricaron en los talleres que la empresa URSSA tiene en Vitoria, aunque en algunos momentos, debido a lo ajustado de los plazos de ejecución, se incorporaron otros talleres de distintos puntos de España.

Unos de los problemas que más preocupó desde el principio y al que se dedicó mucho tiempo y esfuerzo de Ingeniería, fue el diseño de las uniones entre elementos que permitieran holguras suficientes para reducir al mínimo el tiempo de montaje. Dado el gran número de elementos distintos existentes en la estructura (cajón, diafragmas, costillas, paneles diagrid, cordones superiores y patas, etc.) y que todos interactúan entre ellos, era fundamental diseñar

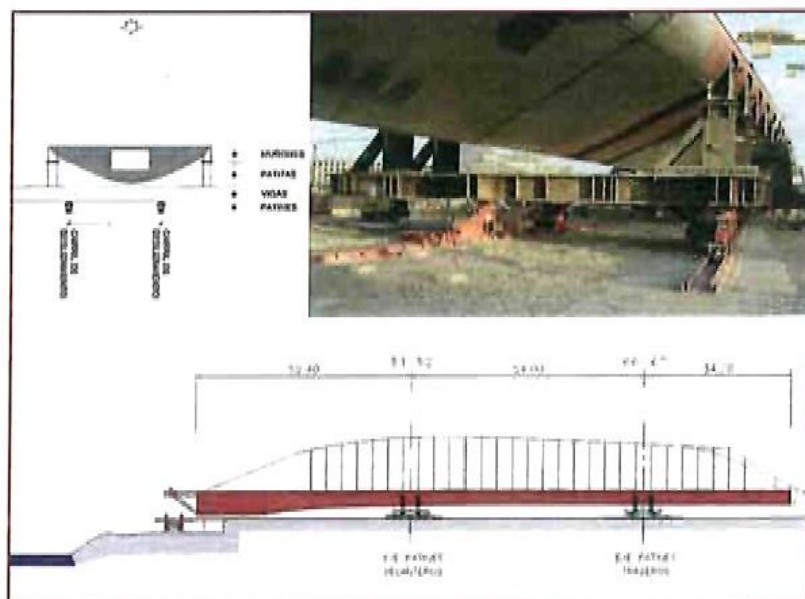
uniones entre ellos que permitieran la máxima construcción posible en taller, donde las condiciones son más favorables, y que facilitara en lo posible el montaje en la obra. El plazo de ejecución de la obra dependía en gran medida de esta cuestión.

Así, el montaje en obra de la estructura metálica comenzó en enero de 2007 y ha finalizado tan sólo 15 meses después, incluyendo el lanzamiento de la parte sur. Inicialmente se montó el cajón con sus diafragmas interiores, luego el cordón superior con torretas de reparto que se apoyaban en el cajón previamente construido y, finalmente, las costillas y los paneles diagrid intermedios.

## LANZAMIENTO DE LA PARTE SUR

Una vez que la parte sur de la estructura, de 140 m de largo y 2.100 toneladas de peso, estuvo construida en la margen derecha del río Ebro, fue necesario desplazarla 123 m hasta situarla en su posición definitiva. Esta fue seguramente la parte más delicada, compleja y espectacular de la construcción de





este puente. Éste fue un proceso sin precedentes, ya que el tramo de puente lanzado era curvo en planta, de canto y anchura variables y totalmente asimétrico. Estos hechos fueron determinantes en el diseño de toda la maniobra e influyeron en gran medida en el diseño y dimensiones de los elementos auxiliares utilizados.

El proyecto del lanzamiento, desarrollado por FHECOR y los Servicios Técnicos de Dragados, empezaba determinando la posición del centro de gravedad de la estructura. Ésta es una cuestión casi trivial en el lanzamiento de otros puentes, pero en éste adquiría una enorme importancia, dado que los esfuerzos a los que se someterían tanto la estructura como los elementos auxiliares durante el lanzamiento dependían en gran medida de la bondad de la estimación teórica de su posición.

El proceso se estructuró en tres fases diferenciadas por el origen del movimiento.

**Primera fase.** La estructura se apoya en unos elementos hidráulicos deslizantes que se mueven por dos carriles. El movimiento total de esta fase fue de 44,00 m en sentido longitudinal y 9,00 en sentido transversal. La estructura es isostática, apoyada en dos sistemas de patines —delantero y trasero—, y presenta el máximo voladizo delantero, compatible con la capacidad de la estructura.

**Arriba, Interior  
pod 2.  
Sobre estas líneas,  
esquema del  
apoyo del puente  
durante el  
empuje.  
En la página de la  
derecha, esquema  
del cambio de  
apoyos.**

**Segunda fase.** La estructura se apoya en los mismos elementos deslizantes que en la fase anterior, pero como el voladizo delantero debe ir aumentando hasta salvar la totalidad del río, es necesaria la colocación de cables en la punta que atiranten el extremo delantero. El movimiento se produce, en esta fase, a través del tiro que estos cables ejercen sobre la estructura desde unas torres provisionales ejecutadas en la parte fija. Para controlar el movimiento deben existir unos cables de retenida que se anclan en un contrapeso, situado por detrás del tramo empujado. El movimiento total de esta fase fue de 79,00 m en sentido longitudinal.

**Tercera fase.** Como los elementos auxiliares necesarios para las dos fases anteriores exigían que el puente se construyera 2,70 m elevado respecto a su posición final, fue necesario, una vez concluido el movimiento horizontal, descender el puente hasta su cota definitiva. El descenso total de esta fase fue 2,70 m en vertical.

### Primera fase: Configuración isostática

En esta primera fase del lanzamiento la estructura se encuentra apoyada en dos conjuntos de patines. El patín delantero, situado a 50 m del extremo delantero, presenta una capacidad de 4.000 toneladas y sujeta la estructura mediante cuatro elementos verticales de 2,50 m, denominados patitas. El patín trasero, situado a 54,00 m del patín delantero y a 34,00 m del extremo trasero del puente, tiene una capacidad de 2.000 toneladas y sujeta la estructura mediante 4 patitas más.

La configuración es isostática, por lo que los esfuerzos a los que está sometida la estructura dependen de la posición del centro de gravedad. Las patitas se sitúan siempre en los bordes laterales de la estructura. Para que éstas se adapten a la forma del puente son necesarias unas piezas provisionales, denominados como muñones. El apoyo entre patitas y muñones se realiza mediante neoprenos. Las patitas presentaban puntales inclinados para resistir las posibles fuerzas horizontales provenientes del viento. En consecuencia, la unión patita-muñón presentaban topes metálicos para la transmisión de estas fuerzas.

Los patines se deslizan por dos carriles dispuestos bajo ellos sobre una cama de teflones. Los patines generan el movimiento mediante unos gatos horizontales que, sujetándose al carril, consiguen el apoyo suficiente para empujar el puente.

Esta primera fase constaba de tres movimientos. Un primer avance longitudinal de 27,00 m, un movimiento de ripado transversal de 9,00 m y un segundo avance longitudinal de 17,00 m. La necesidad de ejecutar un movimiento de ripado transversal se debió a que la parte lanzada no pudo construirse en su alineación definitiva, ya que ello requería invadir parcialmente unos terrenos no autorizados. Por ese motivo, se decidió construir la estructura desplazada 9,00 m hacia el oeste. Esto obligó a que una vez terminado el primer desplazamiento longitudinal, hubiera que realizar un desplazamiento transversal que permitiera ceñirse a

la alineación definitiva. Para realizar este deslizamiento transversal era necesario liberar los patines de carga, transfiriendo ésta a otros gatos situados de forma excéntrica, y girarlos 90°, orientándolos en sentido perpendicular. Obviamente esta maniobra tuvo que realizarse dos veces.

## Segunda fase: Configuración hiperestática

La primera fase del lanzamiento concluye en el momento en que los patines delanteros alcanzan el punto más próximo al río de los carriles de deslizamiento; cuando el puente se encuentra todavía a 79,00 m de su posición final. Para poder continuar el movimiento era necesario, por tanto, retrasar la posición de los patines delanteros sin variar la posición del puente, de forma que éstos volvieran a tener carril que recorrer por delante. Esta operación, que iba a repetirse en numerosas ocasiones, necesitaba la existencia de una estructura auxiliar de apoyo que permitiera apoyar provisionalmente el puente para liberar de carga el patín delantero, de modo que pudiera retrasarse.

Al retrasar el patín delantero, el voladizo que se obtiene en el extremo no es compatible con la estructura isostática de la fase I. Es más, al retrasar el patín delantero por primera vez, el centro de gravedad del puente quedaba fuera del espacio situado entre patines, por lo que para garantizar tanto el equilibrio como la seguridad de la estructura era preciso sujetar el

### Nombre de la obra

PABELLÓN PUENTE DE LA EXPOSICIÓN INTERNACIONAL ZARAGOZA 2008

### Promotor

EXPOAGUA ZARAGOZA 2008, S.A.

### Proyectista

U.T.E. ZAHA HADID LIMITED Y OVE ARUP & PARTNERS, S.A.  
FHECOR INGENIEROS CONSULTORES, (Proyectista de la variante estructural)

### Dirección de la Obra

CARLOS MERINO AGÜEROS (OVE ARUP & PARTNERS S.A.)

### Empresa consultora

U.T.E. ZAHA HADID LIMITED Y OVE ARUP & PARTNERS, S.A.  
IDEAM, S.A.

### Empresa constructora

DRAGADOS, S.A.-URSSA, S. Coop.

### Gerente

DOMINGO GARCÍA SAGRADO. (DRAGADOS S.A.)

### Jefes de Obra

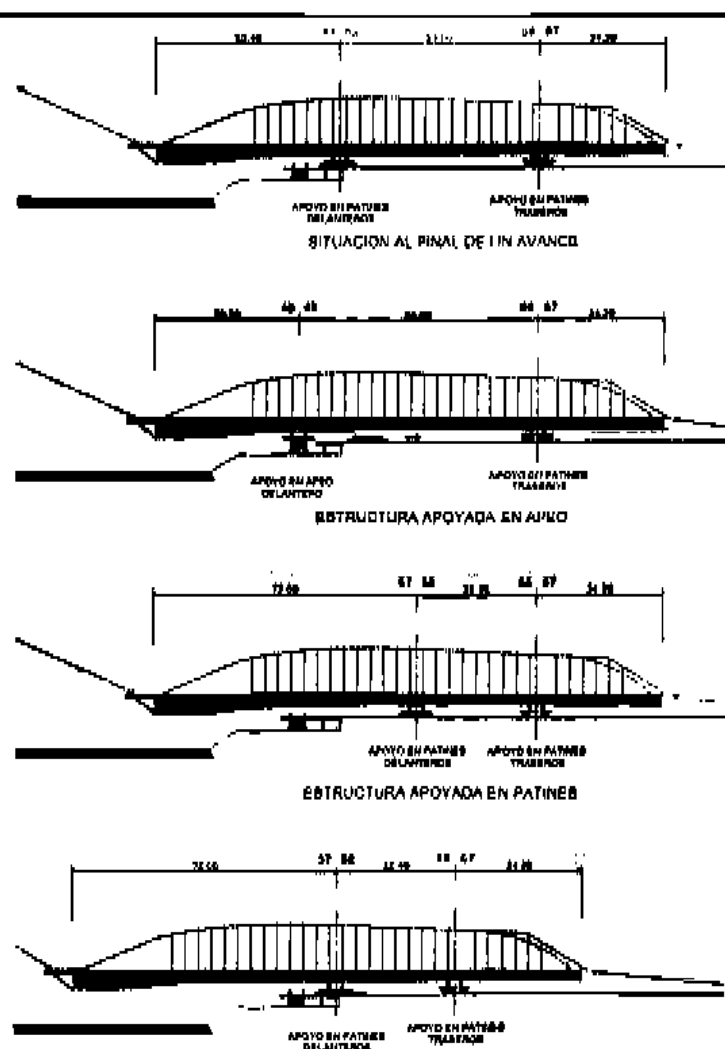
Ejecución Estructural: VICENTE PÉREZ PÉREZ. (DRAGADOS S.A.)  
Fachadas, Interiores e instalaciones: ÁLVARO RUIZ OCAÑA (DRAGADOS, S.A.)

### Presupuesto

Cimentaciones: 1.933.324 euros ; Estructura y fachada: 33.163.344 euros  
Acabados interiores e instalaciones para la Expo: 17.329.634 euros

### PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Cimentación: pilotes de 1,5 y 2 m de diámetro a profundidades de entre 56 y 72,5 m  
Cajón metálico: entre 12 y 29 m de ancho y entre 3,30 y 5,55 m de canto  
Peso total de la estructura metálica ..... 5.824 t  
Peso de estructura lanzada ..... 2.200 t  
Desplazamiento longitudinal ..... 132,17 m  
Desplazamiento transversal ..... 9 m  
Revestimiento interior de cartón yeso curvo ..... 5.411 m<sup>2</sup>



extremo delantero. Para este fin se decidió utilizar cables que, tendidos desde lo alto de unas torres de 40 m de altura construidas sobre la estructura metálica de la península, permitían actuar como un apoyo.

En esta posición, el puente ya era estable y era posible continuar el movimiento hasta que los patines delanteros alcanzaban de nuevo el final de los carriles, momento en el que volvía a repetirse el proceso: apoyo provisional en apoyo, retrasar posición de patines delanteros, continuación de movimiento.

La utilización de cables y torres provisionales evitaba la ejecución de apoyos provisionales en el cauce y, por tanto, no suponía ninguna afectación adicional al régimen del río Ebro.

Con esta estructuración del movimiento los últimos 79,00 m del movimiento se completaron en 15 fases que supusieron 18 configuraciones de apoyos distintas, para las que se estimó una previsión de deformaciones y esfuerzos que fueron contrastados con monitorización durante el lanzamiento.

**Determinación del eje del movimiento.** Para minimizar esfuerzos en las cimentaciones y para asegurar que todos los elementos auxiliares empleados (patines, cables y torres) trabajaran en condiciones óptimas, el eje del movimiento del puente debía cumplir dos condiciones: pasar por el centro de gravedad de la cimentación dispuesta en la península y por el centro de gravedad de la parte lanzada.

El primero de los valores era fácil de determinar, pero el segundo requirió la realización de



numerosos cálculos, ya que un error en su determinación revestiría gran importancia en el futuro proceso. Por este motivo, una vez completada la estructura de la parte lanzada y antes de comenzar el movimiento, se procedió a su pesaje, con objeto de determinar la posición real del centro de gravedad. La diferencia entre el teórico y el real resultó ser de tan sólo 8 cm, lo que resultó un éxito debido a la difícil geometría de la estructura.

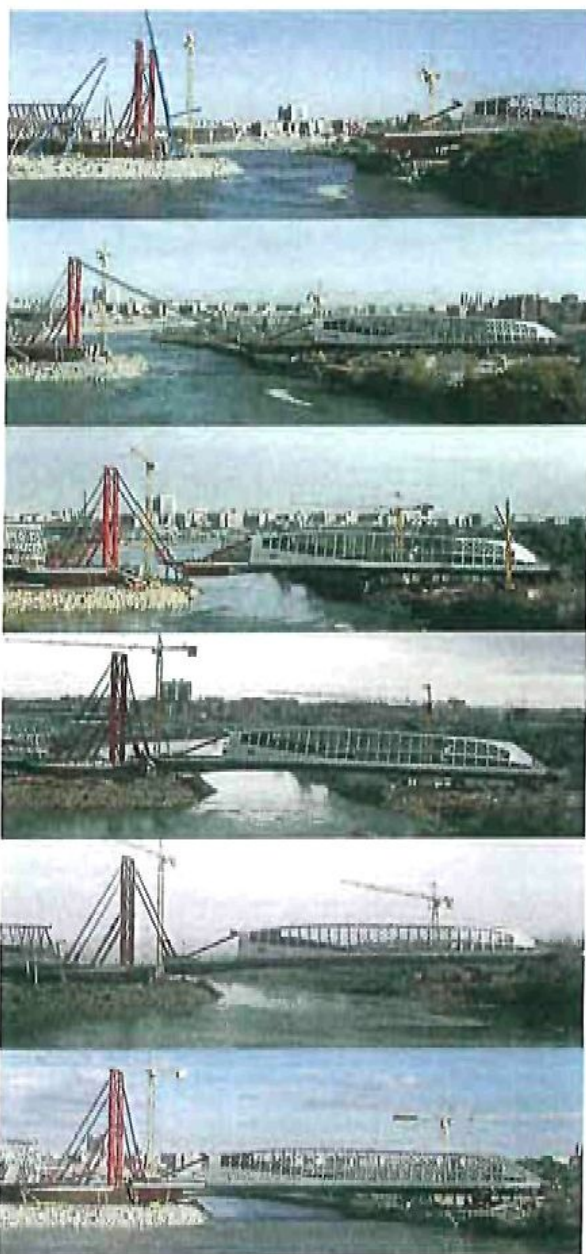
**Cómo se consigue el movimiento. Sistema de tiro y retenida.** A diferencia de lo que ocurría en la primera fase, en ésta el movimiento se consigue mediante el tiro ejercido con cables sobre la estructura, siendo los patines meros elementos pasivos que permiten el deslizamiento.

Los cables tendidos desde las torres que sujetan la parte delantera del puente, están simultáneamente tirando de ella hacia arriba y hacia delante, de forma que están ejerciendo una doble función; la de sujeción y la de intentar acercar la parte lanzada hacia la fija.

Esta última cuestión obliga a disponer otros cables en la parte trasera del puente que permitieran controlar los movimientos, actuando a modo de freno. Estos cables se encontraban anclados en uno de sus extremos a la estructura y, en el otro, a un bloque de hormigón de 800 toneladas de peso. Esto es lo que se conoce como sistema de retenida del puente.

El modo de conseguir el movimiento partiendo de una situación de equilibrio en la que tiro y retenida estuvieran equilibrados, era soltar cable en la retenida manteniendo el valor del tiro, de forma que el puente avanzaba la misma magnitud que el cable que se soltaba. En el proceso de avance era esencial mantener el tiro ligeramente constante, pues una pérdida del mismo suponía perder el apoyo delantero, produciéndose la inestabilidad del conjunto.

Los cables de tiro, los de retenida y los carriles se sitúan simétricos respecto al eje de movimiento, lo que origina situaciones de aparente excentricidad.



Arriba, secuencia del lanzamiento. Debajo, trabajos de acabados, una vez ha concluido el montaje de la estructura.

En esta fase, la estructura se apoya del mismo modo que en la fase anterior. Los muñones apoyan en las patitas y éstas descansan sobre un emparrillado de vigas apoyadas en los patines. La particularidad radica en que la geometría variable en planta obligaba en cada fase a mover transversalmente las patitas sobre la viga de apoyo, para poder adaptarse a los correspondientes muñones, que siempre se sitúan en los bordes del tablero.

### Tercera fase: Descenso del puente hasta su cota final

Para poder instalar bajo la estructura lanzada los elementos necesarios para el deslizamiento, fue necesario construir y desplazar la estructura elevada 2,70 m respecto a su cota definitiva. Por tanto, una vez concluido el movimiento longitudinal, se procedió a descenderlo la magnitud indicada.

Descender el extremo delantero no presentaba ninguna acción especial, pues únicamente era necesario soltar cable. Sin embargo, para descender la parte trasera tuvo que instalarse una estructura de gateo auxiliar, de modo que el puente estuviera apoyado en 4 gatos de 500 mm de carrera, al descender dichos 500 mm se apoyaba

el puente en perfiles metálicos, para liberar los gatos de carga. De esta forma se reinstalaban los gatos 500 mm más abajo y volvían a recibir toda la carga, a carrera máxima. Sólo restaba quitar perfiles por una altura de 500 mm para poder descender nuevamente el puente.

Esta maniobra fue complicada, especialmente porque era necesario realizar los ajustes precisos para que la posición final de la estructura fuera la deseada y, en caso de tener errores de ejecución, minimizarlos.

**Control geométrico e instrumentación.** Para toda la maniobra del lanzamiento, se implantaron dos sistemas que permitían controlar en tiempo real las deformaciones del puente y los esfuerzos en las patitas, de forma que en todo momento se podía verificar que los valores medidos coincidían con los teóricos obtenidos en el cálculo.

### UNIÓN ENTRE LAS DISTINTAS PARTES

Una vez realizado el empuje se inició la unión de las dos partes, comenzando por el cajón y continuando por la estructura superior, cordón superior y paneles de fachada. Concluido el proceso se eliminaron los apoyos provisionales existentes en la península y la estructura quedó apoyada sólo en sus apoyos definitivos.

